

07

Волноводный эффект квантовых ям InGaAs в структуре GaAs на подложке Si с буферным слоем Ge

© В.Я. Алешкин^{1,2}, Н.В. Дикарева³, А.А. Дубинов^{1,2},
Б.Н. Звонков³, К.Е. Кудрявцев^{1,2}, С.М. Некоркин³,
А.В. Новиков^{1,2}, П.А. Юнин^{1,2}, Д.В. Юрасов^{1,2}

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

³ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 17 ноября 2014 г.

Экспериментально исследован волноводный эффект квантовых ям InGaAs в структуре GaAs, выращенной на подложке Si с релаксированным буферным слоем Ge. При достижении величины плотности мощности возбуждения 35 kW/cm^2 при температуре жидкого азота наблюдалось несколько линий стимулированного излучения в диапазоне энергий 1350–1360 meV.

В последнее время возник интерес к лазерам без ограничительных слоев, с волноводом на основе квантовых ям [1–3]. Такие лазеры обладают преимуществами лазеров с широким волноводом: более узкой диаграммой направленности и пониженной нагрузкой на зеркала из-за широкой области локализации моды. В то же время в отличие от лазеров с широкими волноводами они обладают отличной селективностью мод. В частности, в обсуждаемых конструкциях лазерного волновода [2,3] имеется всего одна мода, и поэтому нет проблемы, связанной с возбуждением мод высокого порядка. Следует также отметить практическое отсутствие в таких волноводах рассеянного лазерного излучения и упрощение конструкции лазера.

Также актуальным является направление интеграции кремниевой электроники с оптическими элементами на основе полупроводников

Параметры структуры

№ слоя	Слой	Толщина, nm	Легирование, cm^{-3}	
1	<i>n</i> -GaAs	127.5	$4.1 \cdot 10^{17}$	
2	<i>n</i> -InGaAs	6.4	$2.2 \cdot 10^{17}$	
3	<i>n</i> -GaAs	12.8		
4	<i>n</i> -GaAsP	10.6		
5	<i>n</i> -GaAs	16.2		
Строки 2–5 повторяются 30 раз				
122	<i>n</i> -GaAs	1020	$4.1 \cdot 10^{17}$	
123	<i>n</i> -GaAs	510	$1.6 \cdot 10^{16}$	
124	GaAs	25.5		
125	InGaAs	6.4		
126	GaAs	76.5		
127	InGaAs	6.4		
128	GaAs	255		
129	<i>p</i> -GaAs	680		$0.8 \cdot 10^{17}$
130	<i>p</i> -GaAs	170		$1.1 \cdot 10^{18}$

A_3B_5 , что позволило бы использовать преимущества кремния и прямозонных полупроводников на одном чипе [4].

В настоящее время для решения проблемы роста слоев соединений A_3B_5 на подложке Si широко применяют буферные градиентные релаксированные слои GeSi. Однако наличие толстых буферных слоев затрудняет проведение высокоразрешающей фотолитографии и формирование контактных соединений между Si и A_3B_5 [4].

Данная работа посвящена исследованию излучательных свойств лазерной гетероструктуры на основе GaAs с волноведущими квантовыми ямами InGaAs, выращенной на подложке Si с тонким ($< 0.5 \mu\text{m}$) релаксированным буферным слоем Ge.

Буферный слой Ge выращивали на буферном слое Si, выращенном на подложке Si(100) КЭС-0.01 методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). После осаждения буфера Si рост Ge происходил в 2 этапа, что позволяет снизить плотность прорастающих дислокаций, которые возникают из-за рассогласования решеток Ge и Si [5,6]. На первом этапе температура подложки снижалась до 320°C и выращивался слой

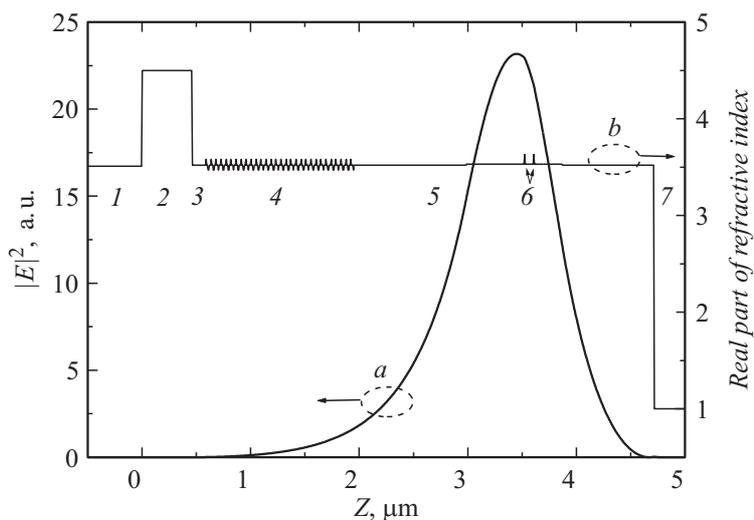


Рис. 1. Зависимость квадрата модуля электрического поля моды ТЕ (*a*) и показателя преломления структуры (*b*) для энергии фотона 1350 meV от координаты роста структуры. Слои: 1 — Si, 2 — Ge, 3 и 5 — GaAs, 4 — сверхрешетка InGaAs/GaAs/GaAsP, 6 — InGaAs, 7 — воздух.

германия толщиной 70 nm. На следующем этапе проводился рост германия толщиной 350 nm при относительно высокой температуре 600°C. Далее проводился отжиг структуры в течение 30 min при температуре 800°C непосредственно в ростовой камере с целью дополнительного уменьшения плотности прорастающих дефектов.

На изготовленном подобным образом буфере Ge/Si методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении была выращена гетероструктура InGaAs/GaAs, параметры которой приведены в таблице. Отметим, что для улучшения качества активной области структуры на начальном этапе была выращена сверхрешетка GaAs/GaAsP/InGaAs.

На рис. 1 приведены результаты расчета распределения квадрата модуля электрического поля основной моды ТЕ в направлении роста структуры (координата Z) методом матрицы распространения. Из рисунка видно, что основная мода ТЕ локализована на масштабе 1.5 μm

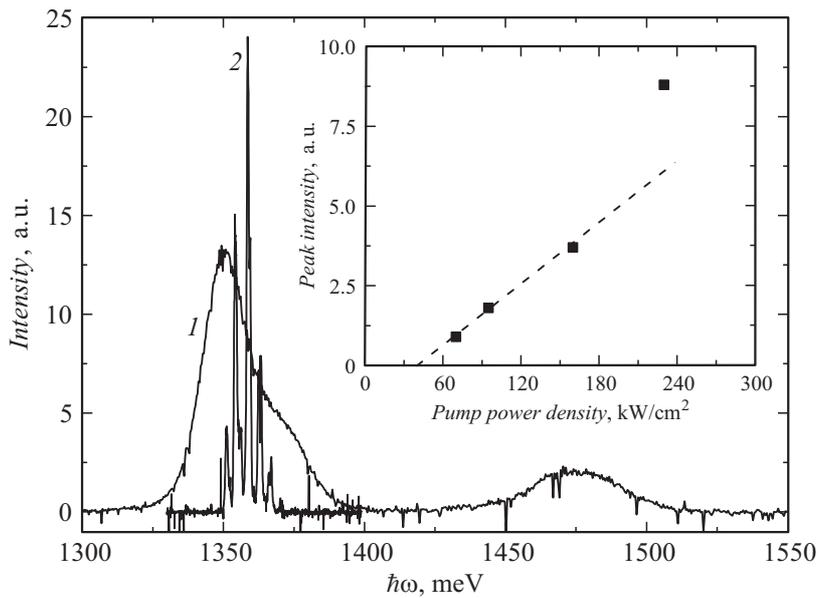


Рис. 2. Спектр спонтанного (1) и стимулированного (2) излучения в структуре при температуре $T = 77$ К. На вставке — зависимость интенсивности наиболее яркой линии генерации от плотности мощности оптического возбуждения.

около квантовых ям и практически не проникает в сильнопоглощающий слой Ge.

Для исследования оптических свойств выращенный образец раскалывался на полоски шириной 3 мм. Качество сколов из-за кремниевой подложки было невысоким. Спектр фотолюминесценции (ФЛ) исследуемого образца, зарегистрированный при температуре жидкого азота при оптическом возбуждении структуры излучением непрерывного Nd:YAG-лазера с удвоением частоты (длина волны 532 нм), приведен на рис. 2 (кривая 1). Возбуждение осуществлялось пятном диаметром $\sim 300 \mu\text{m}$. При этом в спектре ФЛ наблюдалось 2 широких пика: пик в области энергий фотона 1475 meV соответствует излучению из слоя *p*-GaAs, а пик вблизи 1350 meV соответствует излучению из квантовых ям InGaAs. При накачке образца излучением параметрического гене-

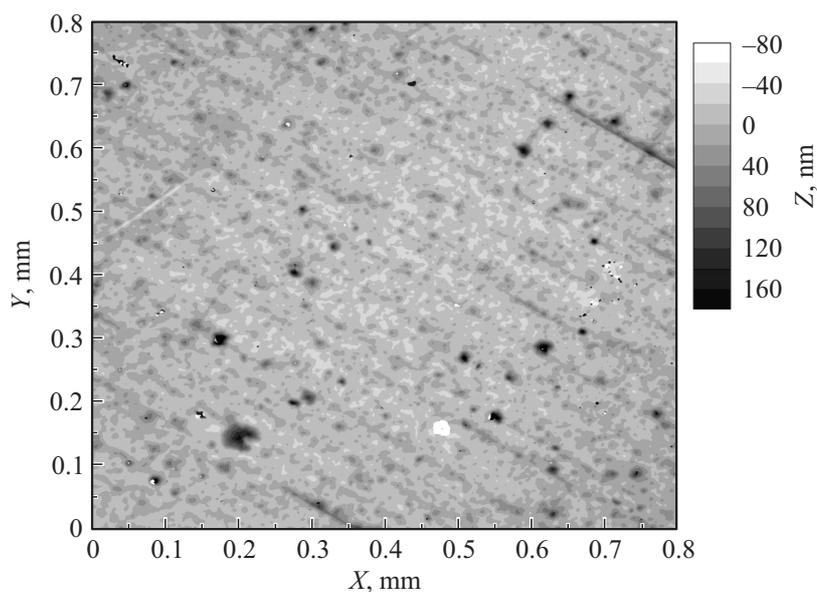


Рис. 3. Карта поверхности структуры.

ратора света Spectra-Physics MOPO-SL (длительность импульса 10 пс, частота повторения 10 Hz, длина волны 650 nm), сфокусированным в полосу с размерами 0.1×3 mm, наблюдалось возникновение нескольких линий стимулированного излучения в области энергий 1350–1360 meV (кривая 2 на рис. 2). На вставке рис. 2 приведена зависимость интенсивности наиболее яркой линии генерации от плотности мощности оптического возбуждения. Эта зависимость является линейной и позволяет определить пороговую плотность мощности для генерации стимулированного излучения на уровне ~ 35 kW/m². Столь высокий порог генерации в данной структуре по сравнению со структурами на подложках GaAs и InP [2,3] связан, вероятно, с невысоким качеством сколов и заметным количеством дефектов и прорастающих дислокаций в структуре, которые служат каналами безызлучательной рекомбинации. Отметим, что в режиме стимулированного излучения наблюдается сразу несколько интенсивных линий излучения, расстояние между

которыми почти постоянно и составляет $\sim 3\text{--}4\text{ meV}$, что примерно на 2 порядка больше расстояния между продольными модами.

На существенное количество дислокаций указывает и карта поверхности структуры (рис. 3), сделанная с помощью оптического профилометра на основе интерферометра белого света Talysurf CCI 2000. Из рис. 3 видно, что поверхность сильно шероховатая ($\sim 40\text{ nm}$), видна квазипериодическая ($\sim 33\text{ }\mu\text{m}$) дислокационная сетка, причем только в направлении, параллельном длинным сколам полосы. Возможно, эта дислокационная сетка играет роль своеобразной „дифракционной решетки с отражением в высоком порядке“ [7,8], определяющей в итоге наблюдаемый характер генерации на нескольких линиях, значительно разнесенных по длине волны излучения по сравнению с интервалом между продольными модами (для резонатора длиной $\sim 3\text{ mm}$).

Таким образом, обнаружено стимулированное излучение в структуре GaAs с волноведущими квантовыми ямами InGaAs, выращенной на подложке Si с буферным слоем Ge; отсутствие качественных сколов и наличие дислокационной сетки определяют высокий порог и необычный спектр стимулированного излучения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-02-31287 мол_а, 13-02-97062 р_поволжье_а), стипендии президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (№ СП-5485.2013.5) и частичной поддержке грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

Список литературы

- [1] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 8. С. 9–16. (*Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A. et al. // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 364–366.*)
- [2] Алешкин В.Я., Дикарева Н.В., Дубинов А.А. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. В. 5. С. 401–406. (*Aleshkin V.Ya., Dikareva N.V., Dubinov A.A. et al. // Quantum Electronics. 2013. V. 43. P. 401–406.*)
- [3] Алешкин В.Я., Афоненко А.А., Дикарева Н.В. и др. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 11. С. 1486–1488. (*Aleshkin V.Ya., Afonenko A.A., Dikareva N.V. et al. // Semiconductors. 2013. V. 47. P. 1475–1477.*)
- [4] Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П. // УФН. 2008. Т. 178. В. 5. С. 459–480. (*Bolkhovityanov Yu.B., Pchelyakov O.P. // Phys. Usp. 2008. V. 51. C. 437–456.*)

- [5] *Colace L., Masini G., Galluzzi F.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72. P. 3175–3177.
- [6] *Luan H.-C., Lim D.R., Lee K.K.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. P. 2909–2911.
- [7] *Васильева В.В., Винокуров Д.А., Золотарев В.В.* и др. // *ФТП.* 2012. Т. 46. В. 2. С. 252–257. (*Vasil'eva V.V., Vinokurov D.A., Zolotarev V.V.* et al. // *Semiconductors.* 2012. V. 46. P. 241–246.)
- [8] *Золотарев В.В., Лешко А.Ю., Лютетский А.В.* и др. // *ФТП.* 2013. Т. 47. В. 1. С. 124–128. (*Zolotarev V.V., Leshko A.Yu., Lyutetskii A.V.* et al. // *Semiconductors.* 2013. V. 47. P. 122–126.)